

На правах рукописи



БУТЕНКО Елена Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ
АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ**

Специальность 2.9.3. Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОМСК 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
СМЕРДИН Александр Николаевич.

Официальные оппоненты:

ЛИ Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения» ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения (ДВГУПС)», г. Хабаровск;

КОВАЛЕВ Алексей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта» ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС)» г. Екатеринбург.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС)», г. Самара.

Защита диссертации состоится 21 декабря 2021 г. в 9 часов на заседании диссертационного совета 44.2.003.01, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС (ОМИИТ))», по адресу: 644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОмГУПСа.

Автореферат разослан «20» октября 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять в адрес диссертационного совета 44.2.003.01.

Тел./факс: (3812) 31-13-44, e-mail: nauka@omgups.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



А. А. Кузнецов.

© Омский гос. университет
путей сообщения, 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В соответствии со «Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г.», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р, предусмотрено увеличение полигона скоростного и высокоскоростного движения, весовых норм поездов, повышение надежности работы устройств системы токосяема.

С ростом скоростей движения потенциальные риски от отказов контактной сети возрастают, перерывы в движении поездов приводят к экономическим потерям. Восстановление работоспособности занимает значительное время, так как протяженность поврежденных участков возрастает.

Традиционным путем для обеспечения требуемых высоких показателей эксплуатационной надежности и работоспособности является увеличение запаса прочности и резервирование. Например, при скоростях движения свыше 160 км/ч не допускается эксплуатация контактных проводов с износом более 20 % от сечения. При этом на менее скоростных линиях допускается износ в полтора раза больший.

Аналогичная ситуация наблюдается с натяжением проводов и тросов, входящих в состав контактной подвески. Несмотря на благотворное влияние повышенного натяжения на качество токосяема, его ограничивают на уровне, не превышающем 50 % от предела текучести материала.

Указанные обстоятельства привели к тому, что технология эксплуатации контактной сети в настоящее время предполагает замену контактных проводов задолго до достижения ими критического износа, а также приводит к снижению динамических характеристик работы системы токосяема.

Особенную актуальность имеют вопросы, связанные с повышением допустимых скоростей движения, а также с продлением ресурса контактных проводов в условиях перехода на скоростное и высокоскоростное движение, при проектировании скоростных магистралей ВСМ-400.

Во время эксплуатации заданные проектные показатели регулировки контактной сети могут выходить за рамки допустимых значений в результате воздействия со стороны электроподвижного состава, природных факторов и токовых нагрузок, что приводит к появлению отказов.

Для обеспечения надежной и качественной работы системы токосяема необходимо непрерывно контролировать работоспособность контактной сети. Совершенствование технологии эксплуатации контактной сети в условиях применения постоянно действующей распределенной системы диагностирования позволит снизить потребность ОАО «РЖД» в поставках контактного провода с повышенными прочностными характеристиками, а также увеличить интервалы его замены, обеспечит возможность движения с высокими скоростями на участках, оборудованных стандартными контактными проводами.

Анализ случаев отказов в работе устройств электроснабжения ОАО «РЖД» показывает, что количество повреждений устройств контактной сети сохраняется достаточно высоким, несмотря на повышение затрат на техническое обслуживание. Основная доля повреждений устройств контактной сети с 2010 по 2020 г. приходится на провода и тросы – около 35 % от общего количества повреждений.

Контактная сеть имеет ряд конструктивных особенностей, из-за которых затруднена возможность контролировать в онлайн-режиме параметры ее работы. К этим особенностям можно отнести значительную протяженность, высокое напря-

жение, ограничения по массе для устройств, закрепленных на контактных проводах. Согласно «Стратегии научно-технологического развития холдинга «РЖД» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 17 апреля 2018 г. № 769-р, одной из главных задач в сфере железнодорожного транспорта является повышение качества технического обслуживания контактной сети за счет использования программно-аппаратных комплексов, которые позволят диагностировать контактную сеть в автономном режиме. Применение автономных диагностических устройств, объединенных в систему, позволит повысить качество мониторинга и снизить потребность в высококвалифицированном персонале, что имеет особенную актуальность в малолюдных условиях Восточного полигона ОАО «РЖД».

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-технических работ Омского государственного университета путей сообщения (тема НИР № г. р. АААА-Б19-219122790113-8).

Степень разработанности темы диссертации. Значительный вклад в области диагностирования контактной сети и повышения ее работоспособности внесли отечественные и зарубежные ученые: И. А. Беляев, А. С. Брюханов, В. Я. Берент, А. Т. Бурков, И. И. Власов, В. А. Вологин, А. Г. Галкин, А. С. Голубков, Ю. И. Горошков, А. Т. Демченко, Ю. И. Жарков, А. В. Ефимов, А. А. Ковалев, А. А. Кудрявцев, В. А. Кудряшов, В. Н. Ли, К. Г. Марквардт, Г. П. Маслов, Н. В. Миронос, А. Н. Митрофанов, В. П. Михеев, В. М. Павлов, А. В. Паранин, А. В. Плакс, А. М. Сафарбаков, О. А. Сидоров, Ю. Г. Семенов, А. Н. Смердин, П. Г. Тюрнин, А. В. Фрайфельд, Y. Chen, V. Fink, F. Kiessling, A. Schmieder, H. Tessun, T. Usuda, G. Wang и другие исследователи.

Имеющиеся на сегодняшний день методы, подходы и технологии диагностирования системы токосъема не обеспечивают снижения числа нарушений в работе, а количество отказов с ростом грузонапряженности становится более значительным. В основном отказы происходят по причинам, связанным с повышенными токовыми и механическими нагрузками при пропуске электроподвижного состава в сочетании с предотказным техническим состоянием устройств токосъема.

Для надежной и качественной работы системы токосъема необходимо усовершенствовать систему диагностики с целью обеспечить перманентный контроль работоспособности системы токосъема во время эксплуатации, а также повышения эксплуатационных показателей и эффективности использования контактной сети.

Целью диссертационной работы является улучшение эксплуатационных показателей контактной сети за счет обоснованного продления срока службы и увеличения допустимого износа проводов контактной подвески в результате изменения технологии ее эксплуатации.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие **задачи**:

установить средние значения и пределы отклонений диагностических показателей, пригодных для регистрации, при изменении основных технических параметров контактной сети;

усовершенствовать математическую модель пролета контактной сети для расчета влияния параметров контактной подвески на частоту колебаний проводов в горизонтальной плоскости;

усовершенствовать метод определения натяжения и погонной массы проводов контактной подвески в пролетах заданной длины на основании анализа затухающих колебаний проводов после прохода токоприемника электроподвижного состава;

усовершенствовать метод регистрации затухающих механических колебаний проводов контактной подвески после прохода электроподвижного состава;

разработать алгоритм работы системы мониторинга контактной сети с помощью устройств распределенной автономной диагностической системы, позволяющий определить наступление критического износа;

предложить автономное устройство мониторинга натяжения, погонной массы и температуры контактных проводов для применения в малолюдных условиях, способное в автоматическом режиме сигнализировать о предотказных состояниях контактной сети;

разработать рекомендации по изменению технологического процесса при эксплуатации контактной сети на основании экспериментальной проверки работоспособности предлагаемых технических и технологических решений.

Объект исследования – контактная сеть.

Область исследования – методы улучшения эксплуатационных показателей устройств электроснабжения; критерии оценки состояния систем электроснабжения железных дорог.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

усовершенствована математическая модель пролета контактной сети для расчета влияния параметров контактной подвески на частоту колебаний в горизонтальной плоскости, *отличающаяся* тем, что в ней учитывается изгибная жесткость контактного провода и влияние неоднородностей массы по длине пролета;

усовершенствован метод определения натяжения и погонной массы проводов контактной подвески в пролетах заданной длины на основании анализа затухающих колебаний проводов после прохода токоприемника электроподвижного состава, *отличающийся* тем, что колебания в нем рассматриваются в горизонтальной плоскости;

усовершенствован метод регистрации затухающих горизонтальных колебаний проводов контактной подвески, *отличающийся* тем, что колебания, вызванные электроподвижным составом, регистрируются с помощью двухосевого акселерометра, при этом колебания в вертикальной плоскости используются в качестве следящего сигнала появления электроподвижного состава на участке, а горизонтальные колебания – для определения параметров контактной сети;

предложен алгоритм работы системы мониторинга, *отличающийся* предварительным внесением расчетных закономерностей изменения частоты колебаний от натяжения и погонной массы контактных проводов в память автономных диагностических модулей;

разработана методика экспериментального определения закономерностей изменения частоты колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости при проходе электроподвижного состава, *отличающаяся* тем, что для получения поверхностей отклика натяжение и погонная масса проводов варьируются на основе ротатбельного планирования эксперимента второго порядка.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Усовершенствованная математическая модель пролета контактной сети для расчета влияния параметров контактной подвески на частоту колебаний в поперечной плоскости *позволяет* повысить точность расчетных зависимостей частоты колебаний контактных проводов.

Усовершенствованный метод регистрации затухающих поперечных колебаний проводов подвески в горизонтальной плоскости *позволит* повысить достоверность определения выпадения гололеда, изменения поперечного сечения контактных про-

водов в результате износа, случаев повышения или понижения натяжения, что приведет к снижению числа отказов контактной сети за счет учета этих сведений эксплуатирующими организациями при принятии решений о дальнейших режимах работы.

Усовершенствованное устройство и способ измерения натяжения и температуры проводов контактной подвески *могут быть полезны* проектным организациям при разработке перспективных систем диагностики, способных в автоматическом режиме сигнализировать о состоянии контактной сети.

Методология и методы исследования. При решении поставленных задач теоретические и экспериментальные исследования проведены на основе положений теории расчета контактной сети, планирования эксперимента, системного подхода, математического моделирования с применением лицензированных программных продуктов на электронно-вычислительной машине (ЭВМ).

Экспериментальные исследования проводились на разработанных лабораторных установках и на полигоне действующей железнодорожной техники ОмГУПС на Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению. Для проведения математических расчетов применялись лицензионные программные продукты: электронные таблицы Microsoft Excel и пакет прикладных программ Matlab/Simulink.

Основные положения, выносимые на защиту:

математическая модель пролета контактной сети для расчета влияния параметров контактной подвески на частоту колебаний в горизонтальной плоскости, в которой реализован учет изгибной жесткости проводов при малых амплитудах колебаний;

метод определения изменения натяжения и погонной массы проводов контактной подвески в пролетах заданной длины на основании анализа затухающих колебаний после прохода электроподвижного состава;

алгоритм регистрации затухающих поперечных колебаний проводов контактной подвески в горизонтальной плоскости с помощью автономных устройств, позволяющий оценить натяжение и погонную массу проводов контактной подвески по частоте колебаний;

устройство мониторинга натяжения, погонной массы и температуры контактных проводов для применения в малолюдных условиях, способное в автоматическом режиме сигнализировать о состоянии контактной сети.

Реализация результатов работы.

Результаты теоретических и практических исследований приняты к использованию в Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурном подразделении Трансэнерго – филиала ОАО «Российские железные дороги» и в проектной организации ООО «Наилучшие доступные технологии» г. Березовский, Свердловская область. Фактическое использование результатов диссертационной работы подтверждено актами внедрения.

Степень достоверности научных положений и результатов диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями, практической реализацией и основана на корректном использовании положений теорий планирования эксперимента, математической статистики и математического моделирования. Адекватность предложенных решений подтверждена достаточно высокой степенью согласования теоретических результатов расчета с экспериментальными данными и практическими результатами (расхождение составляет не более 10 %).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня.

ня: всероссийской научной конференции «Техника и технологии наземного транспорта» (Екатеринбург, 2018); всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (Ростов-на-Дону, 2018); семнадцатой международной научно-практической конференции «Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика» (Алматы, 2018); третьей всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» (Омск, 2018); третьей и четвертой международной научно-технической конференции «Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта» (Омск, 2018, 2020); десятом международном симпозиуме Eltrans 10.0 (Санкт-Петербург, 2019); пятой всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава» (Омск, 2019); научной конференции с международным участием «Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности на транспорте» (Омск, 2020, 2021); одиннадцатой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2020); заседании кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС, Омск, 2021).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе четыре научные статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, одна статья в издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus, один патент РФ на изобретение, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и четырех приложений. Содержание изложено на 168 страницах и включает в себя 27 таблиц и 51 рисунок, библиографический список содержит 127 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и указана степень ее разработанности, приведены цель и задачи, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу отказов устройств контактной сети, влияющих на качество работы системы токосяема. Анализ работы контактной сети Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» (рис. 1) – показывает, что число отказов растет, несмотря на увеличение затрат на техническое обслуживание.

Проведено исследование конструктивных, эксплуатационных и климатических факторов, влияющих на работу устройств контактной сети в условиях скоростного и высокоскоростного движения. На основании проведенного исследования выделена группа показателей – натяжение проводов контактной подвески и погонная масса, которые оказывают существенное совместное влияние на работу системы токосяема. От них зависит ряд параметров, таких как высотное положение проводов, жесткость и ветроустойчивость контактной подвески. Контроль данных параметров контактной сети в реальном времени позволяет своевременно определять предотказные состояния,

устранять причины, вызвавшие их, корректировать режим эксплуатации и таким образом повысить работоспособность системы токосъема.

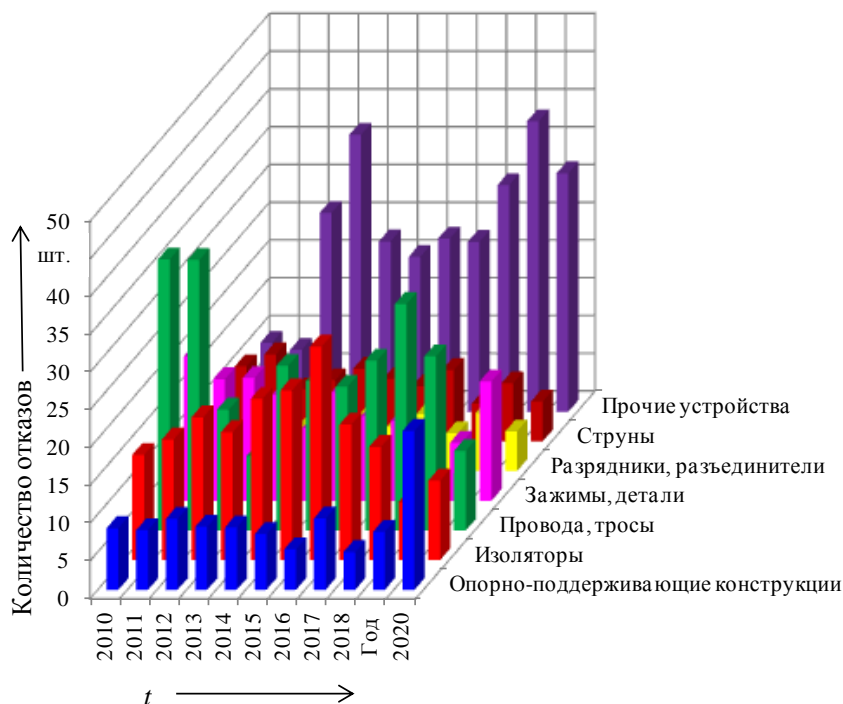


Рис. 1. Распределение отказов контактной сети за 2010 – 2020 г на Западно-Сибирской железной дороге

Имеющиеся в настоящее время диагностические средства и методы диагностирования контактной сети базируются на результатах инспекционных поездок вагона-лаборатории. Опыт показывает, что измеренные значения основных показателей регулировки контактной сети не вполне соответствуют действительным и могут достаточно быстро изменяться в процессе дальнейшей эксплуатации.

Выполнен анализ методов расчета влияния параметров контактной сети на амплитудно-частотную характеристику колебаний. Для моделирования колебаний проводов контактной сети чаще всего используются модель натянутой струны; модель длинномерного изделия, ограниченного грузами; модель балки постоянного сечения с точечной силой, приложенной к середине пролета; волновая модель. Указанные модели имеют ряд недостатков: недостаточно полный гармонический состав колебаний, получаемый в ходе расчетов, сложность с экспериментальной проверкой.

На основании проведенного анализа существующих устройств и методов диагностирования контактной сети, а также факторов, влияющих на работоспособность системы токосъема, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе представлена усовершенствованная математическая модель пролета контактной сети (рис. 2) для расчета влияния параметров контактной подвески на частоту колебаний в горизонтальной плоскости, которая позволяет учитывать изгибную жесткость контактного провода, и наличие неоднородностей с помощью анализа гармонического состава колебаний.

Для того чтобы применить математическую модель растянутого стержня для расчета зависимости частоты поперечных колебаний в горизонтальной плоскости от натяжения и от погонной массы проводов контактной подвески, были приняты следующие основные допущения.

1. Через вертикальные струны энергия колебаний в горизонтальной плоскости не передается.
2. Фиксаторы исключают перемещения контактных проводов в горизонтальной плоскости в точках фиксации.
3. В горизонтальной плоскости контактный провод образует стоячую волну с узлами в начале и в конце пролета (первая мода колебаний).
4. Длина пролета контактного провода равна l , в положении равновесия провод прямолинейно располагается вдоль оси Ox между точками $x = 0$ и $x = l$.

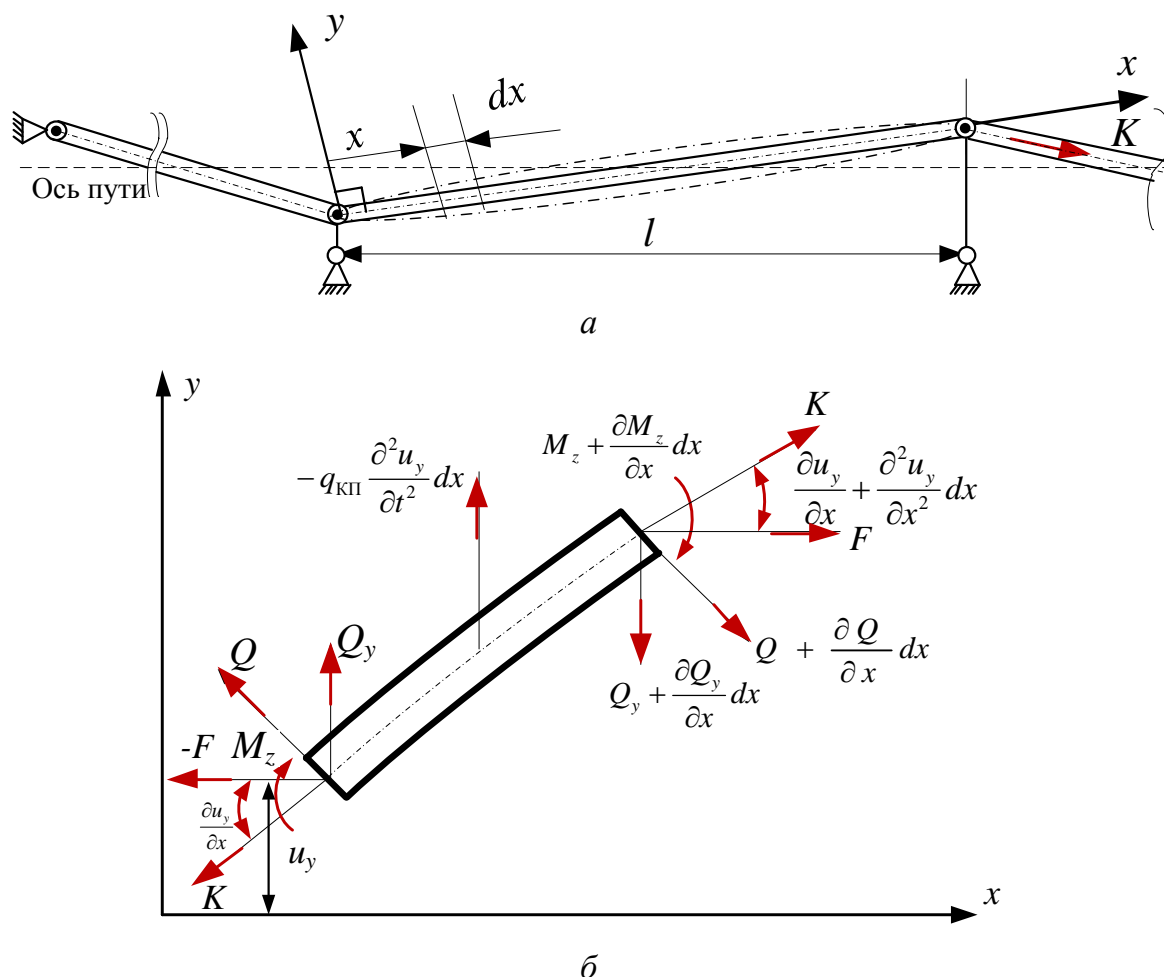


Рис. 2. Силы, действующие на элемент контактного провода в горизонтальной плоскости: a – пролет контактной сети (вид сверху); b – приращение показателей механических колебаний на единичном отрезке

Для решения дифференциального уравнения частоты колебаний контактного провода необходимо задать положение и распределение скорости всех точек контактного провода в начальный момент времени $t = 0$:

$$\begin{cases} u_y|_{x=0} = \varphi(x); \\ \frac{\partial u_y}{\partial t}|_{t=0} = \psi(x). \end{cases} \quad (1)$$

Так как контактный провод имеет неправильную форму в сечении, то необходимо разбить сечение на ряд более простых сечений, тогда момент инерции контакт-

ного провода относительно вертикальной оси определяется по предлагаемому выражению, учитывающему износ нижней части в ходе эксплуатации:

$$J_{кп} = \sum_{i=8}^j \left(\frac{1}{2} (b_{ij} \cdot a_{ij}) \cdot \left(\frac{1}{3} b_{ij} + \frac{1}{2} D \right)^2 + \frac{D \cdot H}{12} \right), \quad (2)$$

где a_{ij}, b_{ij} – горизонтальные и вертикальные катеты треугольников, вписанных в сечение контактного провода, м; D и H – ширина и высота прямоугольника, вписанного в сечение контактного провода, м.

В соответствии с принятыми допущениями погонная масса контактного провода, участвующего в колебаниях, с учетом зажимов будет такой:

$$m = n_k \cdot (m_{к.п} + 0,1), \quad (3)$$

где n_k – число контактных проводов.

Амплитуда колебаний контактных проводов в горизонтальной плоскости не превышает 50 мм, что на два порядка меньше длины пролета (40 – 65 м), следовательно, при описании колебательного процесса можно использовать допущения метода малых колебаний. Модель растянутого стержня позволяет составить расчетное выражение, которое связывает частоту колебаний с натяжением и погонной массой проводов.

После сложения проекций на ось Oy сил, действующих на контактный провод, с учетом малости деформации принято, что $\cos\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) = 1$, а $\sin\left(\frac{\partial u_y}{\partial x}\right) = \frac{\partial u_y}{\partial x}$. Сумму моментов, действующих на элемент контактного провода, приравняем к нулю:

$$-m \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} dx + Q_y - Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial x} dx + K \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} dx \right) - K \frac{\partial u_y}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где Q_y – перерезывающая сила; K – натяжение контактного провода, Н; u_y – поперечное перемещение контактного провода по оси y .

Ввиду малости угла между направлениями K и растягивающей силой F , приложенной к стержню, можно принять его равным отношению $\frac{\partial u_y}{\partial x}$. С учетом равенства нулю суммы моментов всех сил, приложенных к растянутому стержню, можно записать отношение, не учитывающее члены высшего порядка малости:

$$Q_y = \frac{\partial M_z}{\partial x}, \quad (5)$$

где M_z – изгибающий момент. В соответствии с дифференциальным уравнением упругой балки $M_z = E_{к.п} J_{к.п} \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}$ выражение (4) приводится к виду:

$$m \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} + E_{к.п} J_{к.п} \frac{\partial^4 u_y}{\partial x^4} - K \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

где $E_{к.п}$ – модуль упругости материала контактного провода сплошного сечения, Н·м²; $J_{к.п}$ – момент инерции поперечного сечения контактного провода относительно главной центральной оси, м⁴.

Принимая допущение о том, что контактный провод в горизонтальной плоскости совершает гармонические колебания, уравнение имеет частный вид решения, при этом относительно функции $v_r(x)$ дифференциальное уравнение имеет вид:

$$E_{к.п} J_{к.п} v_r^{IV}(x) - K v_r''(x) - m f^2 v_r(x) = 0, \quad (7)$$

где f – частота колебаний контактного провода соответствующей гармоники.

В соответствии с функцией колебаний натянутого стержня закон изменения амплитуды перемещения можно записать в виде:

$$v_r(x) = \frac{\vartheta(0) \cdot l}{\pi \cdot r} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot r \cdot x}{l}\right), \quad (8)$$

где $\vartheta(0)$ – угол изгибающих моментов; r – номер гармоники; l – длина пролета, м.

Усовершенствован метод определения натяжения и погонной массы проводов на основании анализа затухающих колебаний в горизонтальной плоскости в пролетах заданной длины. После подстановки выражения (8) в дифференциальное уравнение (7) и преобразований частота колебаний контактного провода может быть определена по формуле:

$$f = \frac{\sqrt{\frac{\pi^4 \cdot r^4 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}{m \cdot l^4} \cdot \left(1 + \frac{K \cdot l^2}{\pi^2 \cdot r^2 \cdot E_{к.п} \cdot J_{к.п}}\right)}}{2 \cdot \pi}. \quad (9)$$

Решение выражения (9) относительно K позволяет определить натяжение при известном значении частоты основной гармоники колебаний провода в горизонтальной плоскости:

$$K = m \cdot \frac{f}{(2\pi)^2} \cdot \frac{l^2}{\pi^2 \cdot r^2} - E_{к.п} \cdot J_{к.п} \cdot \frac{\pi^2 \cdot r^2}{l^2}. \quad (10)$$

На основании полученного выражения (10) выполняются измерения частоты колебаний в горизонтальной плоскости.

На базе усовершенствованной математической модели пролета контактной сети разработан метод регистрации колебаний затухающих колебаний в горизонтальной плоскости. Для повышения автономности и энергоэффективности предлагается использовать двухосевой акселерометр: одна из осей направлена вертикально, а другая – горизонтально.

Колебания в вертикальной плоскости используются в качестве следящего сигнала, детектирующего появление электроподвижного состава на участке. При срабатывании детектора система переключается на высокую частоту дискретизации и происходит запись колебаний в горизонтальной плоскости во время и после прохода токоприемника в течение заданного промежутка времени.

На основании метода регистрации затухающих колебаний в горизонтальной плоскости разработан алгоритм (рис. 3) работы системы мониторинга, который предполагает работу расположенных вдоль контактной сети датчиков на непрерывной основе, благодаря чему оперативно-технический персонал будет знать о текущем состоянии контактной сети.

После прохода ЭПС данные анализируются, определяется спектр колебаний, оцениваются амплитуды на основной частоте, сравниваются с допустимыми значениями. По частоте колебаний рассчитываются натяжение проводов контактной подвески и их погонная масса. Расчетные значения поступают в базу данных.

Если значения погонной массы либо натяжения вышли за допустимые пределы, то информационное сообщение отправляется на сервер. Получив сигнал, оператор (энергодиспетчер или дежурный электромеханик подстанций) принимает решение о дальнейших действиях. Если значения не вышли за допустимые пределы, то сигнал записывается в базу данных на устройстве. По прошествии суток накопленная информация используется для построения диаграммы суточного изменения натяжения и погонной массы проводов.

Полученные значения сравниваются с предыдущими данными, по изменению погонной массы определяется среднее значение остаточной высоты контактного провода. Данный алгоритм позволяет определять натяжение контактных проводов в произвольном (заранее определенном) месте контактной подвески без прерывов в движении поездов, повысить точность измерений по сравнению с применяемыми ранее способами. Разработанный метод регистрации затухающих колебаний и предложенный алгоритм были внедрены в проектную организацию ООО «НДТ».

В третьем главе описано разработанное автономное устройство, позволяющее измерять одновременно натяжение, частоту колебаний и температуру проводов. Для записи ускорений было разработано устройство, пригодное для установки на контактный провод.



Рис. 3. Блок-схема фрагмента алгоритма для контроля параметров критического износа



Рис. 4. Датчик ускорения, выполненный в форм-факторе струнового зажима

Аналогичным образом акселерометры можно размещать в теле струновых зажимов (рис. 4), что позволяет изучать колебательные процессы в произвольных местах анкерных участков. Акселерометр получает энергию от блока питания с солнечной батареей, установленного на основном стержне фиксатора ближайшей опоры. Параметры солнечной батареи выбираются в зависимости от количества солнечных дней в году и интенсивности излучения, мощность панели не превышает 20 Вт.

Сигнал от акселерометра пригоден для определения амплитудно-частотной характеристики с помощью методов операционного модального анализа и быстрого преобразования Фурье (рис. 5).

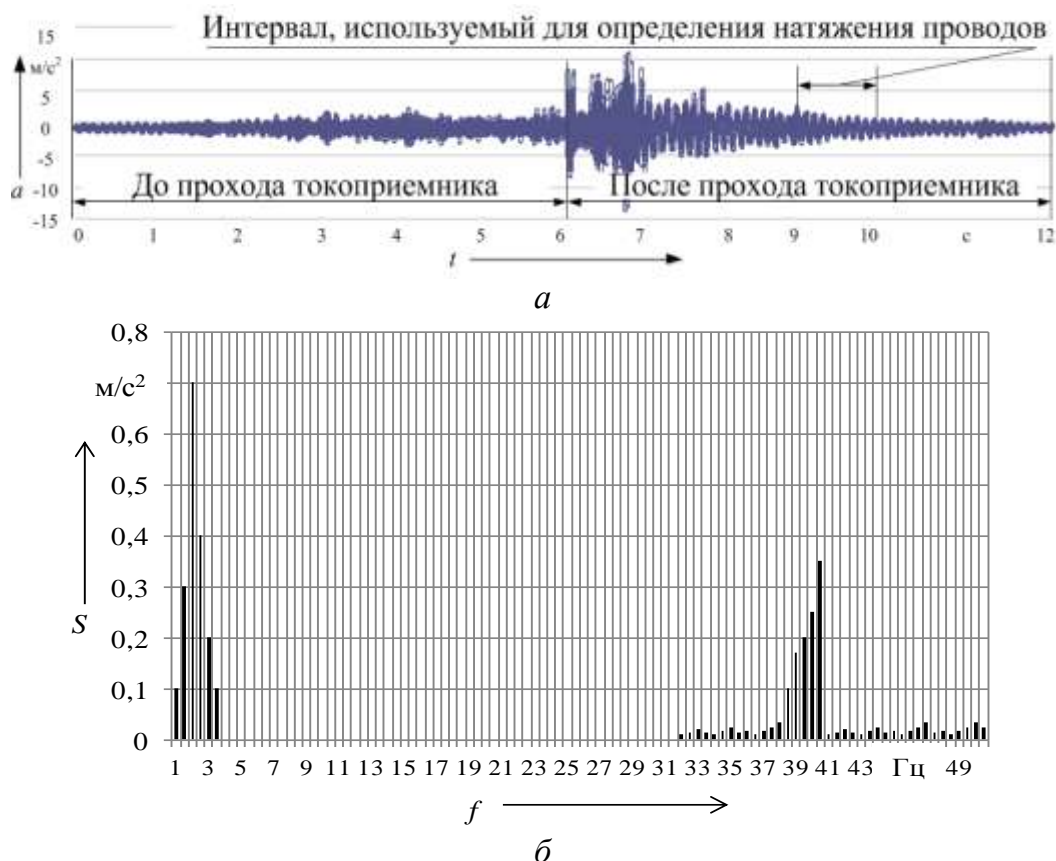


Рис. 5. Определение частоты колебаний с помощью быстрого преобразования Фурье: *a* – виброграмма колебаний провода; *b* – спектр колебаний

Для определения натяжения проводов и оценки состояния контактной подвески разработано программное обеспечение для ЭВМ «Программный комплекс для регистрации и анализа вибрации устройств электроснабжения» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619995). Указанное программное обеспечение основано на реализации предложенного метода расчета натяжения контактного провода.

Блок питания с помощью соединительного кабеля связан с аналого-цифровым преобразователем (АЦП), обладающим модулем радиосвязи, который объединяет датчики с общей базой данных (БД) в одну информационную систему (рис. 6).

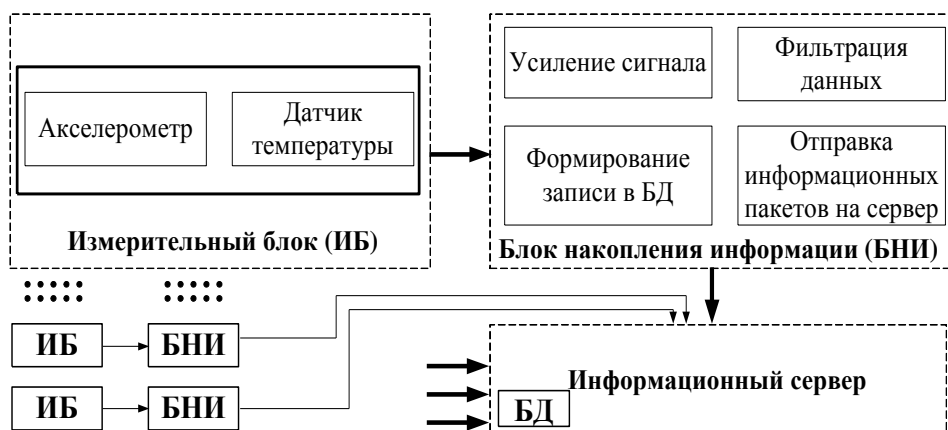


Рис. 6. Функциональная схема программно-аппаратного комплекса мониторинга и диагностирования контактной сети

Частота колебаний может изменяться не только при варьировании натяжения, но и при изменении погонной массы проводов. Валидация показаний датчиков, основанных на применении различных физических принципов, осуществляется сравнением измеренных значений натяжения проводов (рис. 7). На разработанное устройство получен патент на изобретение № 2723527.

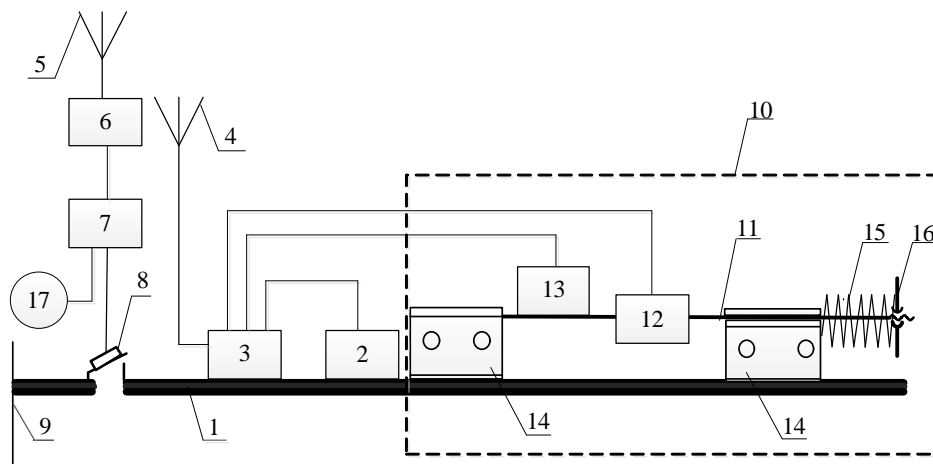


Рис. 7. Устройство для измерения натяжения и температуры контактного провода: 1 – контактный провод; 2 – датчик температуры контактного провода; 3 – радиопередатчик; 4 – передающая антенна; 5 – приемная антенна; 6 – радиоприемник; 7 – блок сравнения и управления; 8 – привод выключателя фидера контактной сети; 9 – источник питания; 10 – датчик натяжения; 11 – гибкий элемент; 12 – датчик усилия; 13 – датчик температуры гибкого элемента; 14 – зажим; 15 – пружина; 16 – механизм натяжения; 17 – сигнализатор

В целях проверки пригодности данной технологии для диагностирования контактной сети разработан функциональный макет, демонстрирующий принцип работы датчика температуры. Для измерения температуры контактного провода используются волоконно-оптические датчики на основе решетки Брэгга. Они устанавливаются на питающих зажимах контактной сети, а устройство регистрации, источник питания для лазерного диода, блок связи с объектом, блок с устройствами фокусировки сигнала устанавливаются на заземленных частях опоры контактной сети (рис. 8).

В соответствии с положениями «Стратегии развития железнодорожного транспорта до 2025 г.» предполагается, что все измерительные модули, размещенные вдоль электрифицированных участков железных дорог, имеют возможность передавать данные по каналам радиосвязи GSM.



Рис. 8. Структурная схема измерения температуры проводов контактной сети на основе волоконно-оптических элементов

В условиях развития малолюдных технологий очень важно снизить затраты на техническое обслуживание установленных технических средств. Предлагаемая автономная система предусматривает режим самодиагностики, в котором происходит сравнение данных, поступающих с блоков системы, и тех, что были записаны ранее, а также друг с другом.

Приведена методика экспериментальных исследований для оценки эффективности применения предлагаемых технических решений. Экспериментальные исследования проводились на действующем испытательном полигоне ОмГУПС на Омской дистанции электроснабжения. Данный участок имеет контактную подвеску КС-160 протяженностью 224,7 м с длиной пролетов 23,4 – 34,5 м. В состав контактной подвески входят контактные провода МФ-100 с номинальным натяжением 9375 Н и погонной массой 0,89 кг/м, несущий трос М-120 с номинальным натяжением 14250 Н и погонной массой 1,058 кг/м. Разработанные блоки устанавливались вдоль анкерного участка для экспериментального определения зависимости частоты колебаний в горизонтальной плоскости от натяжения проводов контактной подвески. Расположение измерительных устройств на испытательном полигоне для одного пролета представлено на рис. 9. Программа ротатбельного эксперимента была реализована с помощью изменения натяжения и выбора различной длины пролетов контактной подвески.

В соответствии с разработанной программой ротатбельного планирования эксперимента второго порядка натяжение изменялось в пределах от 2×6562 до 2×12188 Н. Эксперимент состоит из четырех опытов плана полного факторного

эксперимента типа 2^2 , четырех опытов в «звездных» точках и пяти опытов в центре плана.

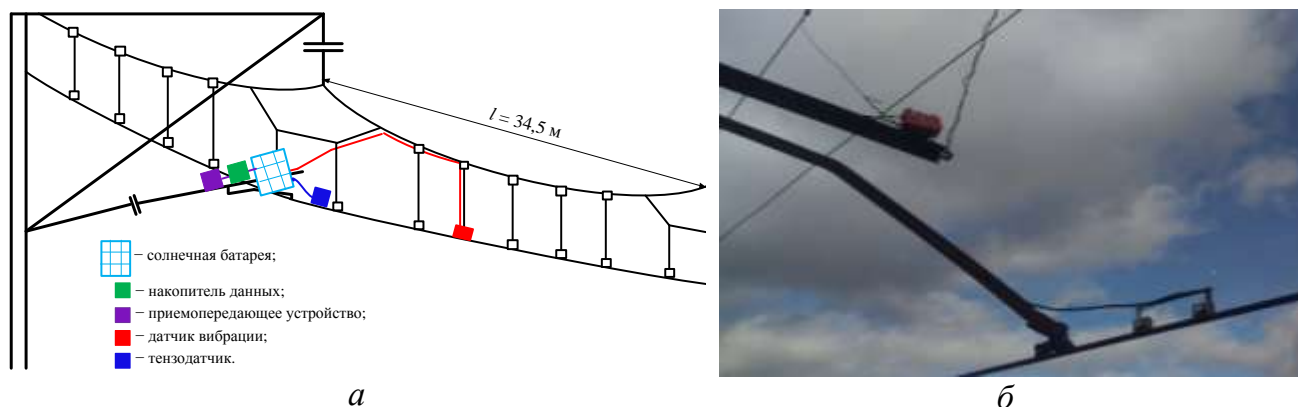


Рис. 9. Схема (а) и реализация размещения (б) измерительных устройств на испытательном полигоне ОмГУПСа на Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2)

Уравнение регрессии в кодированном виде получено с помощью программного модуля Matlab/Curve Fitting Toolbox. После проверки значимости оставлено пять членов:

$$f_j^p = 19,02 - 1,09 \cdot l + 23,68 \cdot 10^{-5} \cdot K - 10,66 \cdot 10^{-6} \cdot K \cdot l + 16,95 \cdot 10^{-2} \cdot l^2 - 3,23 \cdot 10^{-9} \cdot K^2. \quad (11)$$

Значение критерия Фишера для уравнения регрессии и экспериментальных значений не превышает ошибку опыта ($< 5\%$), что говорит об адекватности регрессионной модели экспериментальным данным. Средняя ошибка достоверности вычислительного метода составляет $4,66\%$.

На основании полученного регрессионного уравнения установлено влияние изменения натяжения контактного провода на частотный спектр колебаний при различных сочетаниях действующих эксплуатационных факторов в пролетах соответствующей длины (рис. 10). Аналогично получены поверхности отклика для изношенных контактных проводов.

На этапе компьютерного моделирования средствами прикладного пакета Matlab/Simulink была определена зависимость частоты колебаний контактных проводов от погонной массы и натяжения.

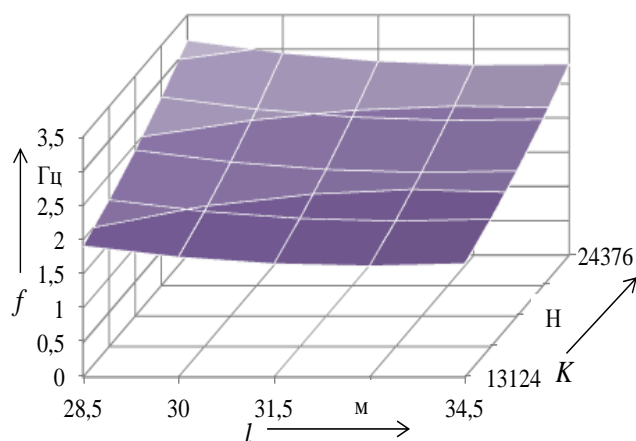


Рис. 10. Поверхность отклика расчетной частоты колебаний от длины пролета и натяжения провода контактной подвески

Для определения адекватности расчетных выражений полученные значения сравнивались с результатами моделирования ранее известными методами и с экспериментальными данными, полученными в ходе натурных испытаний. Из диаграммы представленной на рис. 11, видно, что предложенная модель наиболее полно соответствует данным эксперимента.

В ходе проведенных экспериментальных исследований разработанные блоки показали свою работоспособность и могут быть использованы в диагностических

системах и устройствах мониторинга для оценки состояния контактной сети в режиме реального времени.

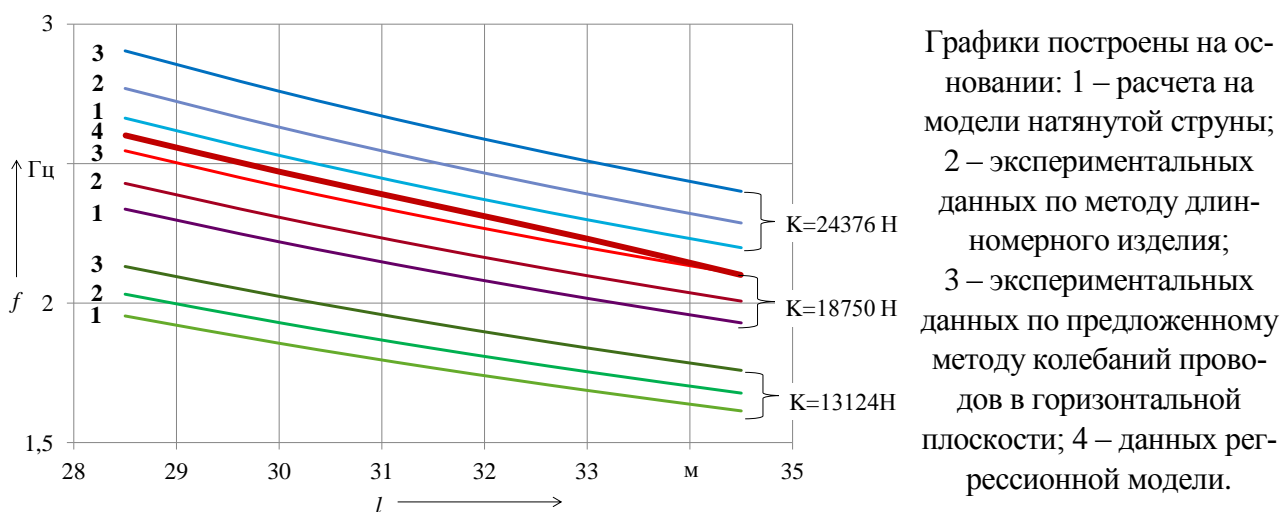


Рис. 11. Зависимость частоты колебаний от длины пролета контактной подвески при различных методах измерения

На основании разработанных положений получен алгоритм определения причины изменения частоты колебаний контактных проводов. Определены пределы изменения частоты колебаний (рис. 12) при различных состояниях контактной подвески с учетом износа, при изменении температуры под действием гололеда.

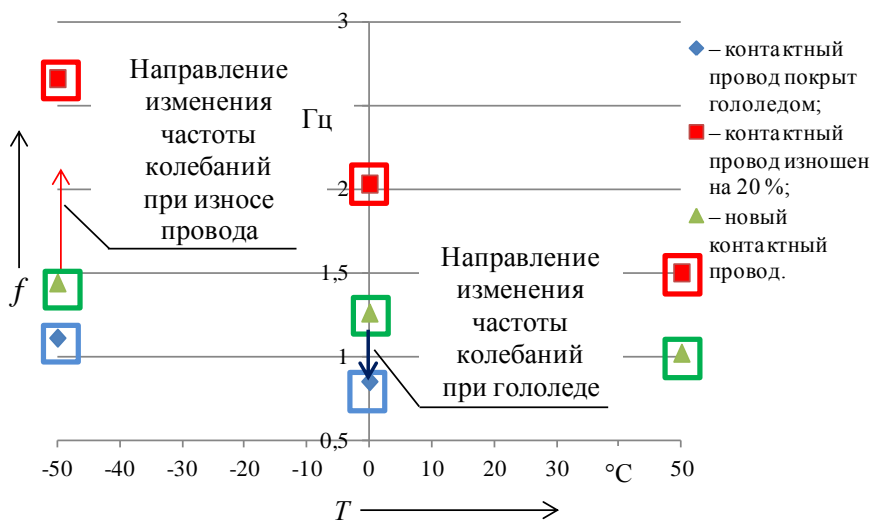


Рис. 12. Пределы изменения частоты колебаний проводов

Разработана топология распределенного автономного комплекса для размещения в анкерном участке, включая схему обмена информацией с сервером базы данных и с автоматизированным рабочим местом оператора.

Испытания показали, что автономность предлагаемого комплекса по питанию не ограничена. Расход электрической энергии восполним с помощью солнечной батареи. По объему хранилища автономность составляет шесть месяцев, после чего происходит перезаписывание цифровых отпечатков поверх более старых записей, при этом численные данные о частоте, натяжении и погонной массе проводов сохраняются в защищенной от стирания области.

В четвертой главе предложена методология технического обслуживания контактной сети с использованием автономной системы распределенной диагностики. В настоящее время в виду эпизодичности технического осмотра и контроля, контактный провод с износом 20 % уже считается выработавшим свой ресурс и подлежит замене, так как до следующей проверки износ может превысить критическое значение, что приведет к обрыву провода. С учетом того, что усовершенствованная технология позволяет постоянно контролировать натяжение и средний износ, предлагается увеличить допустимое значение износа до 30 – 35 %, следя за тем, чтобы удельное натяжение контактного провода не превосходило удвоенного значения предела текучести материала, из которого он изготовлен. Предлагаемое решение позволит продлить срок службы контактных проводов на 30 – 50 % при существующих размерах движения, повышение удельного натяжения контактных проводов обеспечит увеличение допустимой скорости по условию распространения волновых процессов в контактной сети; снизится потребность в проведении инспекционных поездок, связанных с измерением износа традиционным способом, что позволит сократить временные затраты и освободить «нитку» для движения грузовых и пассажирских поездов.

В данной главе представлена технологическая карта по монтажу измерительных устройств на контактной сети, которая была внедрена в Омской дистанции электроснабжения (ЭЧ-2) Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению – структурном подразделении Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД». Предложены рекомендации по изменению нормативно-технической документации эксплуатации контактной сети в связи с применением автономной системы распределенной диагностики, которые позволят сократить время на обслуживание и количество объездов специализированной диагностической техникой.

Результаты расчета экономической эффективности введения в эксплуатацию предлагаемого измерительного комплекса на перспективном полигоне высокоскоростной магистрали Санкт-Петербург – Москва показывают, что ожидаемый экономический эффект за период эксплуатации составит 20 460 тыс. руб. за счет снижения числа инспекционных поездок, упрощения диагностических процедур измерения параметров и прогнозирования состояния контактной сети. Срок окупаемости инвестиций составляет шесть лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические, технологические и методологические решения и разработки, направленные на повышение эксплуатационной надежности и работоспособности контактной сети в условиях скоростного и высокоскоростного движения. Применение предлагаемых технических и технологических решений позволит снизить потребность ОАО «РЖД» в поставках контактного провода с повышенными прочностными характеристиками, а также обоснованно увеличить интервалы его замены на 30 – 50 %, обеспечит возможность движения с более высокими скоростями на участках, оборудованных стандартными контактными проводами в условиях применения предлагаемой постоянно действующей распределенной системы диагностики.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем.

На основании теоретических и практических исследований установлено, что при изменении натяжения и погонной массы проводов частота их колебаний в горизонтальной плоскости изменяется в диапазоне от 1 – 4 Гц в зависимости от длины

пролета контактной сети, выполненной в соответствии с типовым проектом КС-160, что позволяет использовать данный показатель в качестве диагностического.

Усовершенствована математическая модель пролета контактной сети в виде растянутого гибкого стержня, позволившая за счет учета изгибной жесткости и формы поперечного сечения контактных проводов при различных значениях износа, уточнить зависимость частоты колебаний в горизонтальной плоскости различных от натяжения и изменения погонной массы.

Усовершенствован метод определения натяжения и погонной массы проводов контактной подвески в пролетах заданной длины на основании анализа затухающих колебаний проводов, возникающих после прохода токоприемника электроподвижного состава.

Усовершенствован метод регистрации затухающих механических колебаний проводов контактной подвески после прохода электроподвижного состава, позволивший за счет измерения проводов в двух перпендикулярных плоскостях повысить достоверность определения случаев выпадения гололеда, изменения поперечного сечения контактных проводов в результате износа, повышения или понижения натяжения, что приведет к снижению числа отказов контактной сети за счет учета этих сведений эксплуатирующими организациями при принятии решений о дальнейших режимах работы.

Разработан алгоритм работы регистрирующего модуля повышенной автономности, позволяющий определить наступление критического износа, а также опасного изменения натяжения за счет применения интеллектуальной следящей системы запуска режима регистрации колебаний при определении предотказных состояний контактной сети.

Предложено автономное малообслуживаемое устройство диагностирования, способное соединяться в единую информационную сеть из множества устройств по модульному принципу для создания распределенной системы диагностики, позволяющее сигнализировать о предотказном состоянии контактной сети.

Разработаны рекомендации по изменению технологических процессов при эксплуатации контактной сети, что позволит снизить затраты на диагностирование контактной сети на 19 %, увеличить срок службы контактных проводов до замены на 30 – 50 %, повысить допустимую скорость движения по условию распространения волновых процессов в контактной сети на 20 %. Создана технологическая карта по монтажу и техническому обслуживанию измерительных устройств диагностирования на контактной сети в малолюдных условиях.

Экспериментальная проверка работоспособности разработанных устройств, проведенная на полигоне действующей железнодорожной техники ОмГУПС, показала, что расхождение экспериментальных данных и расчетных значений натяжения проводов не превысило 5 % при различных значениях длины пролетов.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается адаптация предлагаемых технических решений для измерения параметров высоковольтных линий электропередачи, волноводов и фидеров, в том числе в условиях резко континентального климата и в северных районах.

Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

а) научные статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Смердин, А. Н. Исследование возможности применения устройств волоконной оптики для контроля параметров контактной сети / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Транспорт Урала. – 2019. – № 3 (62). – С. 85–89.
2. Смердин, А. Н. Применение моделей поперечных колебаний растянутого стержня для расчета натяжений проводов контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2019. – № 4 (40). – С. 25–32.
3. Смердин, А. Н. Совершенствование программно-аппаратного комплекса мониторинга и диагностики контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, Г. Р. Ермачков. – Текст : непосредственный // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 5 (83). – С. 23–28.
4. Смердин, А. Н. Экспериментальная проверка качества адаптации математической модели контактной сети для расчета частоты колебаний / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, А. В. Тарасенко. – Текст : непосредственный // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 208–215.

б) научная работа, опубликованная в издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus:

5. Smerdin, A. N. Transverse horizontal vibrations of contact network wires for monitoring their tension during operation / A. N. Smerdin, E. A. Butenko, S. A. Stupakov, G. R. Ermachkov. // E3S Web of Conferences 217– 2020. – № 03002. – С. 1–7.

в) патенты и свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Патент на изобретение № 2723527 Российская Федерация, МПК В60М 1/12 (2006.01), Н02Н 5/04 (2006.01). Контактная сеть : № 2019119282 : заявлено 19.06.2019 : опубликовано 11.06.2020 / Бутенко Е. А., Смердин С. Н., Голубков А. С., Смердин А. Н. Бюл № 17. – Текст : непосредственный.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020619995 Российская Федерация. Программный комплекс для регистрации и анализа вибрации устройств электроснабжения : № 2018665208 : заявлено 12.08.2020 : опубликовано 03.12.2018 / Смердин А. Н., Голубков А. С., Ермачков Г. Р., Бутенко Е. А., Слатин А. И.; правообладатель Омский гос. ун-т путей сообщения. 2 с. : ил. – Текст : непосредственный.

г) научные работы, опубликованные в прочих изданиях:

8. Бутенко, Е. А. Автономный измерительный комплекс для параметров системы токосъема / Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Техника и технологии наземного транспорта : материалы всероссийской научной конференции аспирантов. – Екатеринбург : Уральский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 114–117.
9. Бутенко, Е. А. Совершенствование методов исследования контактной сети с помощью автономного измерительного комплекса / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 225–231.
10. Бутенко, Е. А. Перспективные методы исследования системы токосъема / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы международной научно-технической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – С. 6–12.
11. Бутенко, Е. А. Диагностическая модель контактной сети для разработки устройства определения натяжения проводов / Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Технологическое обеспечение ремонта и повышение динамических качеств железнодорожного подвижного состава : материалы всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – С. 237–243.

12. Бутенко, Е. А. Применение беспроводных элементов сенсорных сетей для определения натяжения контактных проводов и несущих тросов / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 46–50.
13. Бутенко, Е. А. Повышение эффективности эксплуатации системы токосъема за счет онлайн мониторинга основных параметров контактной сети / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, А. С. Голубков. – Текст : непосредственный // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы международной научно-технической конференции. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2020. – С. 6–11.
14. Бутенко, Е. А. Совершенствование методики экспериментального определения натяжения проводов контактной сети на испытательном полигоне / Е. А. Бутенко, А. Н. Смердин, В. М. Павлов. – Текст : непосредственный // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научной конференции посвященной. – Омск : Омский гос. ун-т путей сообщения, 2021. – С. 89–94.
15. Чепурко, А. Е. Снижение экологической нагрузки от электрифицированного транспорта и объектов транспортной инфраструктуры / А. Е. Чепурко, А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Прорывные технологии электрического транспорта : тезисы международного симпозиума «Eltrans - 2017» – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2017. – С. 89–90.
16. Смердин, А. Н. Применение автономного комплекса для измерения параметров системы токосъема / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции : в 2 томах. – Алматы : Казахская академия транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева., 2018. – Т. 2. – С. 72–79.
17. Смердин, А. Н. Совершенствование диагностических средств для проведения натурных исследований системы токосъема / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сборник научных трудов по материалам всероссийской научно-практической конференции : в 2 томах. – Ростов-на-Дону : Ростовский гос. ун-т путей сообщения, 2018. – Т. 2. – С. 333–336.
18. Рыжков, А. В. Перспективные методы совершенствования экологических показателей системы токосъема электрифицированного транспорта / А. В. Рыжков, Е. А. Бутенко, С. Н. Смердин. – Текст : непосредственный // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности : материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2018. – С. 248–255.
19. Голубков, А. С. Совершенствование автономных систем диагностики и мониторинга состояния контактной сети / А. С. Голубков, Г. Р. Ермачков, Е. А. Бутенко. – Текст : непосредственный // Тезисы десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0» : в 2 частях. – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – Ч. 1. – С. 47–49.
20. Смердин, А. Н. Устройство для контроля температуры контактной сети, основанное на применении волоконно-оптических элементов / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, О. А. Астахова. – Текст : непосредственный // Тезисы десятого международного симпозиума «Eltrans 10.0» : в 2 частях – Санкт-Петербург : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2019. – Ч. 2. – С. 56–57.